

西部高陡岩质岸坡地质环境与变形破坏特征研究

杜朋召 高平 魏杰

(地质工程院)

[摘要] 随着西部水力资源的开发,岸坡的稳定性已成为影响工程建设与运营的关键问题之一,而岸坡的地质环境与变形破坏特征,是分析评价岸坡稳定性的基础。基于西部已建工程高陡岩质岸坡的地质资料,通过岸坡地貌地质环境、结构面统计数据及岩体变形监测数据分析,总结西部高陡岸坡的地质环境和岩体结构特征,指出岸坡变形具有时效性,岩体破坏存在渐进性特征,对西部水电工程岸坡稳定性分析和支护设计具有重要的指导作用。

[关键词] 西部 水电工程 高陡岩质岸坡 地质环境 变形破坏特征

1 引言

我国是水能资源最为丰富的国家,理论蕴藏达到6.94亿kW,其中约80%的水能资源分布在西部地区^[1]。随着西部大开发战略的实施,我国水电资源的开发已转向西部的高山峡谷地区。由于丰富的水力资源,西部地区水电工程的数目越来越多、规模也越来越大。其中,仅“西电东送”的骨干电站就达29座,这些电站中约90%的大坝是100m以上高坝。

随着西部大型水电工程的建设,高坝开挖、水库蓄水所产生的工程岩质岸坡高度约300~800m,自然坡度大多在40°以上。其中,锦屏水电站岸坡高度超过1000m,溪洛渡水电站岸坡的自然坡度大于60°。如此规模的高陡岩质岸坡在世界范围内也是罕见的,其地质环境与变形破坏特征研究对岸坡稳定性分析评价具有重要的指导作用。因此,本文基于西部已建水电工程的地质资料,通过分析岸坡的地质地貌环境、结构面统计数据及变形监测数据,研究其地质环境与变形破坏特征,从而为西部高陡岩质岸坡的稳定性分析提供参考。

2 西部岩质岸坡环境特征

2.1 地貌环境

西部地区位于亚欧大陆的中部,处于连接环太平洋和大西洋圈纽带的欧亚大陆桥上,包含了我国大陆地势的第一和第二级阶梯。第一阶梯平均海拔在4000m以上,第二级阶梯海拔约1500m。由第

一阶梯向第二阶梯的海拔降低,形成了我国大陆地形自西向东骤降的特点,发育于青藏高原的长江、黄河、澜沧江、怒江、雅鲁藏布江等深切成谷,在该大陆地形坡降带上孕育了高山峡谷的地貌特征。

目前,我国已建、在建、拟建的大型水电工程主要位于西部的高山峡谷地区。高山峡谷地貌中的水电工程岸坡往往具有坡体高陡、坡型多变的特点,自然岸坡的最大高度已超过1000m,最大自然坡度超过60°,如表1所示。

2.2 地质环境

西部地区,受印度洋板块和亚欧板块在喜马拉雅地区的强烈碰撞影响,高原物质向东部及东南部挤出。在高原周边和扬子地台西缘,形成和发育了大量晚近期以来的强烈走滑和逆冲活动性断裂。其中,大型活动断层371条,总长度达2.8万km。该地区也是我国高烈度地震的高发区域,区内存在11个8.5级、45个8级、208个7.5级和478个7级潜在震源区。因此,在该地区形成了以“高地应力”和“强地震活动”为特点的区域动力地质条件。

青藏高原在第四纪期间的快速隆升,塑造了西部地区高山峡谷的基本地貌形态和河谷的发育历史,也影响了该区域岩体的新构造运动、浅表生改造及剥蚀风化条件^[2]。内、外动力地质作用在该区域的强烈交织与转化,导致了西部地区特殊、复杂的地质环境条件和强烈的河谷动力学过程,决定了该区域与人类工程活动有关的地质环境的基本状况。由于特殊的地质环境和复杂的演化历史,使得西部地区水电工程岸坡在赋存环境上具有地应力偏高、应力环境复杂特点。

作者简介:杜朋召(1986),男,河南省鲁山人,工程师,硕士,从事水利水电工程地质勘察研究工作。

表1 西部大型水电工程岸坡^[2]

工程名称	岸坡位置	自然坡高(m)	自然坡度(°)	人工坡高(m)
白鹤滩水电站	进水口右岸	450	>50	>250
向家坝水电站	坝区左岸	350	>50	200
溪洛渡水电站	坝区左、右岸	300~350	>60	300~350
锦屏水电站	坝区左岸	>1000	>55	620
小湾水电站	坝区左、右岸	700~800	47	670
拉西瓦水电站	坝区左岸	700	>55	300~400
天生桥水电站	厂房后	400	50	350
糯扎渡水电站	左岸坝肩	800	>43	300~400
紫平铺水电站	进水口左岸	350	>40	280

(1) 地应力偏高

地应力场是西部地区水电工程岸坡在赋存环境上的一个显著特征。西部地区,特别是西南地区恰好处在环青藏高原东侧的周边地带,印度板块与欧亚板块碰撞所导致青藏高原物质向东及东南方向挤出,致使环青藏高原周边地带受到强烈挤压,形成了该区域的高地应力环境。根据对西部地区区域构造应力场的数值模拟反演研究^[4],环青藏高原周边地带区域构造应力场总体背景水平为6~10 MPa。

考虑到水电工程建设的选址要求,工程修建区域的应力水平一般高于总体背景值,西部地区部分水电工程实测地应力数据如表2所示。一般认为地应力测值大于20 MPa为高地应力区,从表中可以看出,西部许多水电工程的建造区域都属于高应力环境。

表2 西部地区水电工程地应力数据

序号	工程名称	最大主应力值 (MPa)	最小主应力值 (MPa)
1	白鹤滩水电站	5.6~23.9	4.4~14.3
2	大岗山水电站	9.0~26.0	5.0~8.0
3	糯扎渡水电站	5.0~14.0	2.5~7.5
4	天生桥水电站	20.0	3.5~6.0
5	溪洛渡水电站	15.0~20.0	4.0~7.0
6	小湾水电站	9.0~21.0	4.0~8.0
7	锦屏二级水电站	25.0~40.0	5.0~8.0
8	拉西瓦水电工程	19.7~22.9	5.8~13.1
9	二滩水电站	20.0~40.0	5.4~14.4

(2) 应力环境复杂

在地形起伏剧烈的深切河谷地区,岩体内部的应力场是在区域地应力场的基础上,伴随河流下切与演化,在谷底和岸坡一定范围内,发生应力调整而形成的局部地应力场。我国西部地区区域地质环境复杂,加之深切河谷的地貌特征,进一步加剧了水电工程高陡岩质岸坡应力场的复杂程度。

关于河谷区地应力场的分布规律,许多学者进

行了相关的研究。其中,修俊峰等^[5]根据某工程3个坝段的地应力实测资料,结合地应力的地质成因及其展布规律分析,将河谷区应力场分为应力松弛带、应力集中带、应力趋稳带和应力稳定带。黄润秋等^[6]对锦屏、二滩、小湾、溪洛渡、瀑布沟、龙羊峡、拉西瓦、李家峡等大型水电站的河谷地应力分布规律进行了系统研究,发现可将坝区河谷应力场从宏观上划分为3个带和1个谷底高应力区。其中,应力增高带内的应力高低主要受岩性及断裂构造控制,谷底部位应力受河谷形态控制,谷坡应力释放主要是通过“塑性破坏区”来实现。

在河谷下切过程中,随着侧向应力的解除,岸坡产生回弹变形,岩体应力产生相应的调整,其结果是在岸坡一定深度范围内形成二次应力场分布。河谷底部是应力的集中部位,越靠近谷底应力集中越明显,最大主应力在谷底或者河床中心近乎水平,而两边岸坡则向河床倾斜。岸坡岩体中主应力的方向基本是顺坡面方向及垂直坡面方向的,且最大主应力的方向近似平行于坡面。

河谷发育对地应力的影响存在一定范围,一般越接近地表或谷坡影响越明显。随着埋深的增加,岩体的应力状态将逐步过渡到区域构造应力场,主应力发生明显的偏转,形成应力分异带。应力分异带的深度与河谷形态、岸坡的地层岩性和地质构造等有关。例如,黄河拉西瓦水电站坝址区应力分异带深度约为1/2~1/3坡高,澜沧江小湾水电站坝区应力分异带的深度约为坡高的1/4~1/6^[7]。

3 西部岩质岸坡岩体结构特征

由于西部地区所处的自然环境与地质环境条件,水电工程岸坡的岩体结构与这一地区的深切峡谷地貌和活跃的内外动力地质条件密切相关,是地壳表层内外动力地质作用在岸坡这类地质体上的综合表现。其中,结构面发育和无确定性结构面是西部岩质岸坡岩体结构的显著特征。

(1) 结构面发育

我国西部地区受到青藏高原持续隆升的影响,地形变化大,区域地质构造复杂,高山峡谷地貌中的水电工程岸坡,多为高地应力环境下快速卸荷过程的产物^[8]。由于在地质历史时期岸坡岩体遭受多期的构造运动和强烈的浅表生改造,其内部广泛存在着规模不等、产状不同、性质各异的结构面,其数目之多在西部诸多水电工程建设中均有体现,如表3所示。

表3 西部地区水电工程中结构面统计数据^[9]

序号	工程名称	实测结构面(条)	成果应用
1	漫湾水电站	1314	左岸滑坡分析
2	龙滩水电站	7000	进水口边坡倾倒变形分析
3	小湾水电站	18361	右岸下游边坡稳定性分析
4	李家峡水电站	6800	导流洞进出口边坡稳定性分析
5	思林水电站	1200	边坡倾倒变形稳定性分析
6	恰普其海水利枢纽	2000	左岸山体稳定性分析
7	糯扎渡水电站	8679	右岸坝肩边坡稳定性分析
8	黄登水电站	6000	卸荷岩体工程特性分析
9	锦屏一级水电站	1238	导流洞边坡稳定性分析
10	洪家渡水电站	8000	进水口边坡稳定性分析

岩体内部不同类型的结构面不仅影响到岸坡的变形特点和破坏模式,也对岸坡的稳定性起到控制作用。结构面的大量存在及其力学特性受库水位变动影响,使得节理岩质岸坡有别于其他类型的边坡,其变形破坏机制及稳定性的分析更具复杂性。

(2) 无确定性滑动面

滑动面是指滑坡体沿未扰动体下滑的分界面,是滑坡地貌的重要组成部分之一。滑动面通常是依附于岩土体内原有的不连续面形成的贯通错动界面,或者是岩土体内新生的贯通剪切面。对于岩质边坡而言,滑动面通常是随着节理、裂隙等不连续面的逐渐贯通而形成的。

虽然水电工程岸坡内部的节理、裂隙发育,岩体

结构复杂,容易沿结构面形成贯通的滑动面,但在漫长的地质历史时期,许多天然岸坡所受的地质改造已基本完成。作为工程建设的基础和环境,在外界条件无大的改变时,岸坡基本处于稳定状态,内部并不存在确定性的滑动面。

然而,节理岩质岸坡的稳定性不是静止的,是一个动态演化的地质历史过程。随着工程建设、水库蓄水等人类活动的开展,岸坡原始的平衡被打破,从而导致岩体内部的节理裂隙逐渐张开、延伸。在西部地区部分水电工程的修建或运营中,工程岸坡受到开挖、水库蓄水等因素的影响,岸坡岩体存在局部的变形或垮塌现象,基本并未产生整体或大范围的边坡失稳。例如黄河上游某水电工程大型岩质岸坡,在水库蓄水过程中,约5年间岸坡岩体变形超过40 m,局部垮塌、掉块现象不断,但未发生整体失稳,勘探资料表明,岸坡内部无确定性的滑动面。

4 西部岩质岸坡变形破坏特征

由于西部岩质岸坡存在岸坡高陡、坡型多变、岩体内部结构面发育、无确定性滑动面的特点,其变形破坏特征有别于其他类型的边坡,其变形多具有时效性、岩体破坏存在渐进性特征。

(1) 时效性变形

在岩土工程中,人们通常将岩土体变形破坏的时间效应称为时效性。岩质岸坡在以自重应力为主的应力状态下,随时间向临空方向持续变形的现象,称为岩质岸坡的时效变形。对于西部岩质岸坡而言,岩体内部节理、裂隙发育,在岸坡自重应力作用下,岩体内部的结构面逐渐扩展、连结,岩体变形随时间延长而逐渐增大。若岸坡内部不存在或尚未形成确定性的滑面,岸坡将难以在短时间内产生整体或大范围的失稳。在我国西部的水电工程建设中,时效变形在许多工程岸坡中都有存在,在某些工程中,岩体时效变形的持续时间达7年以上,如表4所示。

表4 西部水电工程岸坡的变形监测数据

序号	工程名称	变形部位	变形监测时间
1	锦屏一级水电站	左岸坝肩边坡	2009.6.8-2012.12.28
2	龙滩水电站	蠕变体B区边坡	2002.1-2003.8
3	龙羊峡水电站	虎山边坡	1987.2.15-1989.7.12
4	拉西瓦水电站	右岸某岸坡	2009.8.12-2011.5.8
5	小湾水电站	进水口边坡	2002.10.27-2004.12.29
6	五强溪水电站	左岸船闸边坡	1990.3-1997.12
7	姚河坝水电站	厂房高边坡	2001.7-2005.8
8	引子渡水电站	右岸自然边坡	2001.7.5-2003.5.26

分析西部质岸坡的时效变形,其实质是在自重应力作用下,岸坡岩体内部能量转换的一种调整变形,具有随时间发展的持续性和长期性,其结果是导致岸坡潜在滑动面的逐渐孕育和最终贯穿。

(2) 渐进性破坏

岩质岸坡渐进性变形破坏的机理是,岸坡前缘坡脚处存在剪应力集中,为“蠕变剪滑段(cd)”；岸坡后缘坡体顶部为拉应力集中区域,为“蠕变拉裂段(ab)”；岸坡中部仅有变形而未剪滑,该段为保持岸坡整体稳定起到锁固作用,称为“蠕变变形段(bc)”^[10],如图1所示。

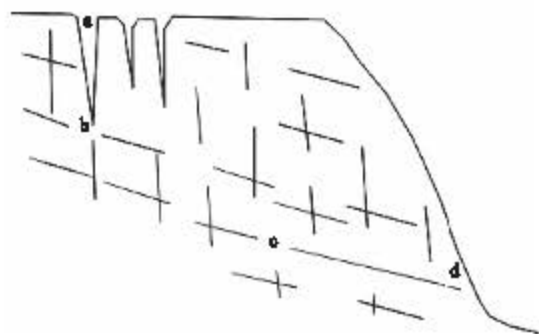


图1 岩质岸坡渐进性破坏模型

其变形破坏演化过程大致为:①岸坡坡脚剪切滑移,由于岸坡应力调整及应力分异作用,坡脚附近最大剪应力显著增高,坡体沿早期发育的倾向坡外的缓倾结构面或卸荷节理向外蠕动滑移;②岸坡坡顶后缘开裂,岩体中早期存在的平行于河谷走向的一组结构面,在岸坡重力作用下,由岸坡顶部向下逐渐开裂,形成张力带;③蠕滑-拉裂渐进性破坏,由于后缘开裂及坡脚剪切滑移,岸坡中部锁固段通常沿着两组相同倾向结构面,以剪切破裂-裂缝张裂扩展-剪切破坏的形式,在一定时间内逐渐发展,最终导致岸坡整体失稳。

由于岩质岸坡变形具有时效性,岸坡岩体的失稳破坏不是瞬间便发生整体破坏,而是一个由局部破坏逐渐扩展以至形成贯通滑面的渐进过程。随着时效变形的不断增加,岩体失稳破坏的区域也逐渐扩大,当由其自重应力引起的剪应力大于岩体的长期抗剪强度时,岸坡进入加速蠕变阶段,最终导致岸坡产生整体失稳。

5 结论

基于西部已建水电工程的地质资料,通过分析

岸坡的地质地貌环境、结构面统计数据及变形监测数据,总结西部高陡岩质岸坡地貌地质环境特征、岩体结构特征和岩体变形破坏特征,得到主要结论如下:

(1)西部高陡岩质岸坡在地貌上,一般具有坡体高陡、坡型多变的形态特征;在地质环境上,具有地应力偏高、应力环境复杂和浅表生改造强烈等特征;

(2)西部高陡岩质岸坡在岩体结构方面,通常具有结构面发育、岩体结构复杂和无确定性滑动面的特征;

(3)西部高陡岩质岸坡的地貌、地质环境和岩体结构特征,决定了岸坡变形多通常具有时效性、岩体破坏存在渐进性特征。

本文通过西部高陡岩质岸坡地貌地质环境、岩体结构特征和变形破坏规律的研究,对西部高陡岸坡的稳定性评价与支护设计具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] 中国水力发电工程学会. 中国水力发电年鉴(第十卷)[M]. 北京:中国电力出版社,2007.
- [2] 黄润秋. 中国西南岩石高边坡的主要特征及其演化[J]. 地球科学进展,2005,20(3):292-297.
- [3] 李天斌. 岩质工程高边坡稳定性及其控制的系统研究[D]. 成都:成都理工大学博士学位论文,2002.
- [4] 刘亚群,李海波,裴启涛,等. 深切河谷区地应力场分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(12):2435-2443.
- [5] 修俊峰,徐同海,马岱馨,等. 沿河谷地区地应力的地质成因及其展布规律[J]. 岩石力学与工程学报,1986,5(3):257-265.
- [6] 黄润秋. 岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(8):1525-1544.
- [7] 黄润秋,王士天,张倬元,等. 中国西南地壳浅表层动力学过程与工程环境效应研究[M]. 成都:四川大学出版社,2002.
- [8] 王长青,刘洪涛. 西南某水电站边坡变形特征分析[J]. 水电能源科学,2015,33(5):135-137.
- [9] 汪小刚,贾志欣,张发明,等. 岩体结构模面网络模拟原理及其工程应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.
- [10] 程谦恭,胡厚田,彭建兵,等. 高边坡岩体渐进性破坏粘弹塑性有限元数值模拟[J]. 工程地质学报,2000,8(1):25-30.